

# NIC偏光モードの性能評価

高橋 隼

兵庫県立大学 天文科学センター 西はりま天文台  
〒679-5313 兵庫県佐用町西河内 407-2

## Performance Evaluation of the NIC Polarimetry Mode

Jun TAKAHASHI

*Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,  
407-2 Nishigaichi, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan  
takahashi@nhao.jp*

(Received 2019 November 8; Accepted 2019 December 10)

### 概要

2018年に再開発されたNIC偏光観測モードの性能評価を行った。Jバンドで $\sim 0.4\%$ – $6\%$ までの偏光度を持つ強偏光標準星を観測し、偏光度および偏光方位角について測定値と文献値を比較することで、測定の正確さを評価した。偏光度については、装置内での消偏光に起因する若干の系統誤差が疑われるものの、系統誤差は $0.3\%$ 以内であると評価された。偏光方位角については、数度の精度の範囲で有意な系統誤差は見られなかった。さらに、観測計画の立案に役立つように、偏光度のランダム誤差と総積分時間の関係式を求めた。

### Abstract

The author hereby presents the evaluated performance of the NIC polarimetry mode, which was re-developed in 2018. Imaging polarimetric observations were conducted for strongly polarized standard stars with their polarization degrees of  $\sim 0.4\%$ – $6\%$  in the J band. The accuracy of the polarimetry in terms of the polarization degrees and position angles was evaluated based on a comparison between measured values and those found in the literature. The systematic bias in polarization degrees was found to be within  $0.3\%$ , though some depolarization in the instrument was suspected. No significant systematic bias in polarization position angles was detected for the precision of a few degrees. In addition, for use in planning observations, a relationship was established between the random error in the polarization degrees and the total integration time.

**Key words:** science instrument — near-infrared — polarimetry

### 1. はじめに

2018年に、西はりま天文台 3 波長同時観測近赤外カメラ (NIC) の偏光観測モードが再開発された(高橋 他 2018)。高橋 他 (2018)は無偏光標準星の観測を行い、望遠鏡を含めた観測システムに起因する器械偏光度を $0.01\pm 0.37\%$  (J),  $0.02\pm 0.82\%$  (H),  $0.04\pm 0.39\%$  (Ks) と求めた。器械偏光は小さく、少なくともJバンドとK<sub>s</sub>バンドでは $1\%$ の偏光度を検出できる潜在能力があることが示された。その後、筆者は強偏光標準星の観測を行い、天体の偏光度( $P$ )と偏光方位角( $\Theta$ )をどの程度正確に計測できるかを評価したので報告する。また、得られたデータを用いて、偏光度のランダム誤差( $\sigma_P$ )と、天体の等級・総積分時間を関係付けることも行なった。

### 2. 事前準備

事前準備としていくつかの強偏光標準星を観測し、高橋 他 (2018)に記述された方法(式(1)–(9))で偏光度と偏光方位角を求めた。ここで求めた偏光方位角 ( $\Theta_0$ と表記する) は装置に固定された座標系上の値である。 $\Theta_0$ を赤道

座標系 (南北方位を $0^\circ$ とし、観測者から見て反時計回りを正とする) での値 ( $\Theta$ と表記する) に変換するには、以下の計算を行う必要がある。

$$\Theta = -(\Theta_0 - \phi) \quad (1)$$

ここで $\phi$ はカセグレン焦点のインストルメントローテータの実位置角である<sup>1</sup>。

初期設定のままでは、測定された偏光方位角の測定値 ( $\Theta$ )と文献値( $\Theta_{\text{lit}}$ )に系統的な誤差が見られたので、両者の差ができるだけなくなるように、半波長板の回転角 $0^\circ$ の向きを再定義した。 $0^\circ$ と再定義したのは「一側リミットスイッチ検知位置から正の方向に $7.5^\circ$  (モータを+333ステップ) 回した向き」である。

### 3. 観測・解析

性能評価に用いた強偏光標準星の一覧を表1に示す。観測天体は *A List of Polarized and Unpolarized Standard Stars for UKIRT*<sup>2</sup> から選んだ。標準星の偏光度( $P_{\text{lit}}$ )と

<sup>1</sup> FITSヘッダの“PA”項目に値が記録されている。

<sup>2</sup> <https://www.ukirt.hawaii.edu/instruments/irpol/irpol.stds.html>

偏光方位角( $\Theta_{\text{lt}}$ )はWhittet et al. (1992)が測定したものである。2019年4月17日および22日に、Jバンドでの等級が $\sim 7$ – $10$ 等、偏光度が $\sim 0.4\%$ – $6\%$ の範囲にある5天体を観測した。

1回の露出時間は2–60秒で、半波長板4回転角に対応する4回の露出を1セットとして、同じ設定(露出時間、ローテータ方位角)に対して5セット前後の観測を行なった。

高橋 他 (2018)と同様の方法で、画像処理、測光、偏光度・方位角導出を行なった ( $\Theta$ については式(1)の変換も実施)。有意な器械偏光は検出されていないので(高橋 他 2018)、器械偏光の除去は行っていない。

図1–2には、各セットの規格化したストークスパラメータ $q=Q/I$ ,  $u=U/I$ (装置座標)を時系列にして表示した。表2–4には測定した $P$ ,  $\Theta$ をまとめた。ただし、同じ天体・同じ $\phi$ に対して複数の露出時間で観測した場合には、最も長い露出時間で得られた結果を表に記載した。

#### 4. 偏光度・偏光方位角の正確性

表2–4には、偏光度の測定値と文献値の差( $P - P_{\text{lt}}$ )を記載している。 $P - P_{\text{lt}}$ の絶対値は、多くの場合、 $P$ のランダム誤差<sup>3</sup>( $\sigma_P$ )と同程度かそれより小さい。しかし、中には $\sigma_P$ の数倍大きいものもある。測定値 $P$ にランダム誤差を上回る系統誤差があるかは、微妙なところである。

$P - P_{\text{lt}}$ の平均値は  $-0.08 \pm 0.16\%$  (J),  $-0.12 \pm 0.12\%$  (H),  $-0.13 \pm 0.18\%$  (K<sub>S</sub>) であり、 $P/P_{\text{lt}}$ の平均値は  $0.98 \pm 0.06$  (J),  $0.95 \pm 0.07$  (H),  $0.92 \pm 0.12$  (K<sub>S</sub>) である。統計的に有意だとは言えないものの、測定値 $P$ は文献値 $P_{\text{lt}}$ よりやや小さめに出る傾向が疑われる。観測システム内の消偏光により、偏光効率(実際の偏光度に対する測定される偏光度の比率)が80%から90%台になっている可能性がある。偏光度数%の光源を使って偏光効率を正確に測定することは難しく、完全偏光に近い光源を使う必要がある。偏光効率のより正確な測定は今後の課題である。とはいえ、 $P - P_{\text{lt}}$ の平均値と標準偏差から、偏光効率(消偏光)の補正をしなくても、偏光度測定値の系統誤差は0.3%以内であると言えるだろう。ただし、これは偏光度が数%以内の天体に対する評価である。

偏光方位角に関しては、測定値( $\Theta$ )と文献値( $\Theta_{\text{lt}}$ )の間で、数度のランダム誤差を有意に上回る差異は見られない(表2–4)。事前準備として行なった半波長板回転角 $0^\circ$ の再定義が適切であったと言える。

#### 5. 偏光度のランダム誤差と等級・総積分時間の関係

科学的な観測を立案するにあたって、求める偏光度の精度(ランダム誤差 $\sigma_P$ )を達成するためにどの程度の総積分時間が必要かを見積もる必要がある。そこで $\sigma_P$ と等級 $m$ 、総積分時間 $T$ を関連づける。

図3は、総カウント $C$ に対して $\sigma_P$ をプロットしたものである。 $\sigma_P$ が $N$ セットのデータから得られた場合、 $C$ は「 $4N$ フレームの常光測光値と異常光測光値の合計」である。 $C$ が大きくなるほど、凡そべき乗則で $\sigma_P$ が小さくなることが分かる。バンドにかかわらず、単一のべき乗則でフィッティングしたところ、

$$\log(\sigma_P) = -0.624 \cdot \log(C) + 1.697 \quad (2)$$

<sup>3</sup>  $\sigma_q, \sigma_u$ から誤差伝搬の式で導出。高橋 他 (2018)参照。

という関係式が得られた(図3の実線)。図3の破線は $\sigma_P$ が天体の光子ノイズのみで決まっている時に予想される $\sigma_P$ (理論的な最小値)を描いたものである。カウントと電子数の変換係数は、バンドにかかわらず $9.5 \text{ e}^-/\text{ADU}$ とした<sup>4</sup>。実際の $\sigma_P$ は、光子ノイズのみに基づく予想値よりも1桁程度大きい。これは光子ノイズ以外にも測定値を擾乱させるノイズが存在することを示す。

図4は、図3の縦軸を $\sigma_P/P$ に替えたものである。少なくとも $P$ が数%までの範囲では、 $\sigma_P/P$ は $C$ に対してあまり良く相関しないことが分かった。したがって、 $C$ と関連づける相手は $\sigma_P/P$ より $\sigma_P$ のほうが良いことが確認できた。

図5は、 $T \cdot 10^{-m/2.5}$ に対して $C$ をプロットしたものである。ここで $T$ は総積分時間なので、 $N$ セットの観測をした場合、 $T = 4N \times (\text{single exposure time})$ である。J, H, K<sub>S</sub>バンド、それぞれ、

$$C = a \cdot T \cdot 10^{-m/2.5} \quad (3)$$

という関数でフィットしたところ、表5に示す比例定数 $a$ が得られた。

式(2)と(3)を組み合わせることで、総積分時間 $T$ から偏光度のランダム誤差 $\sigma_P$ を予測したり、逆に、ある $\sigma_P$ を得るために必要な $T$ を見積もることができる。

ただし、式(2)はJバンド等級が10等未満の比較的明るい天体に対して得られた関係である。より暗い天体を観測する場合には、卓越するノイズ成分の種類が変わることによって、式(2)の関係が成り立たない可能性がある。また、本試験の結果は $N=5$ セット前後のデータから得られた。 $\sigma_P$ と総積分時間 $T$ を関連づけたが、 $T$ が同じでも $N$ が大きく異なると、本試験で得られた関係が成り立たない可能性がある。さらに、本試験では $P$ が数%までの天体を観測対象とした。 $P$ が著しく大きい( $> 10\%$ )場合も、本試験で得られた関係が適用できない可能性がある。

#### 6. おわりに

高橋 他 (2018)と本試験で得られた、NICの偏光観測性能を表6にまとめる。偏光効率のより正確な測定、Jバンドで10等より暗い天体での偏光度ランダム誤差の測定等が今後の課題として挙げられる。

本開発は、部分的に「特色のある共同利用・共同研究拠点の形成事業」、および日本学術振興会科研費(15K21296)の支援を受けました。また、禅野孝広氏には半波長板ユニットの制御について、非常に有益なアドバイスをいただきました。感謝申し上げます。

#### References

- 石黒 正晃, 高橋 隼, 禅野 孝広, 時政典孝, 黒田 武彦. 2011, 西はりま天文台年報, 21, 13  
 高橋 隼, 禅野 孝広, 斎藤 智樹, 伊藤 洋一. 2018, Stars and Galaxies, 1, 17  
 Whittet, D. C. B., Martin, P. G., Hough, J. H., et al. 1992, ApJ, 386, 562

<sup>4</sup> 実際にはバンド(検出器)毎に若干異なり、J:  $9.2 \pm 0.2$ , H:  $9.8 \pm 0.2$ , K<sub>S</sub>:  $9.4 \pm 0.2$  ( $\text{e}^-/\text{ADU}$ )である(石黒 他 2011)。

<sup>5</sup> <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

**Table 1.** Observed strongly polarized standard stars. The polarization degrees,  $P_{\text{lt}}$ , and position angles of polarization,  $\Theta_{\text{lt}}$  refers to *A List of Polarized and Unpolarized Standard Stars for UKIRT*<sup>2</sup>. The magnitudes are obtained from the SIMBAD database<sup>5</sup>.

Object	Date	Sgl. exp. (s)	Band	Mag.	$P_{\text{lt}}$ (%)	$\Theta_{\text{lt}}$ (°)
HDE 283809	19-04-17	8	J	6.994±0.020	3.81±0.07	57±1
			H	6.46±0.03	2.59±0.07	58±1
			K	6.169±0.023	1.71±0.11	55±3
Elias 29 (Taurus)	19-04-17	8	J	7.39±0.06	2.43±0.02	29±1
			H	6.53±0.04	1.57±0.02	27±1
			K	6.20±0.04	1.07±0.10	34±4
Elias 19 (Taurus)	19-04-17	8	J	7.689±0.023	3.06±0.05	36±1
			H	6.505±0.024	1.94±0.03	35±1
			K	6.049±0.021	1.36±0.03	38±1
HD 38563C	19-04-22	2, 10, 60	J	9.729±0.026	6.03±0.10	71±1
			H	9.122±0.022	3.68±0.10	70±1
			K	8.757±0.021	2.21±0.55	78±17
Elias 9 (Taurus)	19-04-22	2, 10	J	7.591±0.024	0.44±0.02	145±3
			H	6.062±0.021	0.41±0.02	143±1
			K	5.482±0.018	0.22±0.02	146±5

**Table 2.** Measured values of  $P$  and  $\Theta$  in J band.  $\phi$  represents the position angle of the instrumental rotator. Values for Elias 9 are excluded because of large errors ( $\sigma_P = 0.5\%$ ,  $\sigma_\Theta = 105^\circ$ )

Object	$\phi$ (°)	$P$ (%)	$P - P_{\text{lt}}$ (%)	$P/P_{\text{lt}}$	$\Theta$ (°)	$\Theta - \Theta_{\text{lt}}$ (°)
HDE 283809	0	3.60±0.23	-0.21	0.94	58.7±1.9	1.7
Elias 29	0	2.70±0.21	0.27	1.11	29.2±2.3	0.2
Elias 19	0	2.98±0.06	-0.08	0.97	36.1±0.6	0.1
Elias 19	45	2.94±0.08	-0.12	0.96	35.3±0.8	-0.7
Elias 19	90	2.94±0.19	-0.12	0.96	36.5±1.8	0.5
Elias 19	135	2.95±0.09	-0.11	0.96	35.1±0.9	-1.0
HD 38563C	0	5.84±0.12	-0.19	0.97	73.8±0.6	2.8
avg. ± stdv.			-0.08±0.16	0.98±0.06		0.5±1.3

**Table 3.** Measured values of  $P$  and  $\Theta$  in H band.

Object	$\phi$ ( $^\circ$ )	$P$ (%)	$P - P_{\text{lt}}$ (%)	$P/P_{\text{lt}}$	$\Theta$ ( $^\circ$ )	$\Theta - \Theta_{\text{lt}}$ ( $^\circ$ )
HDE 283809	0	$2.38 \pm 0.09$	-0.21	0.92	$58.6 \pm 1.1$	0.6
Elias 29	0	$1.52 \pm 0.11$	-0.05	0.97	$31.0 \pm 2.1$	4.0
Elias 19	0	$1.85 \pm 0.09$	-0.09	0.95	$35.7 \pm 1.4$	0.7
Elias 19	45	$1.92 \pm 0.12$	-0.02	0.99	$37.0 \pm 1.8$	2.0
Elias 19	90	$1.66 \pm 0.13$	-0.28	0.86	$37.2 \pm 2.3$	2.2
Elias 19	135	$1.66 \pm 0.30$	-0.28	0.86	$34.5 \pm 5.1$	-0.5
HD 38563C	0	$3.59 \pm 0.12$	-0.09	0.98	$75.9 \pm 0.9$	5.9
Elias 9	0	$0.44 \pm 0.18$	0.03	1.07	$138.7 \pm 11.6$	-4.3
avg. $\pm$ stdv.			$-0.12 \pm 0.12$	$0.95 \pm 0.07$		$1.3 \pm 3.1$

**Table 4.** Measured values of  $P$  and  $\Theta$  in  $K_S$  band.

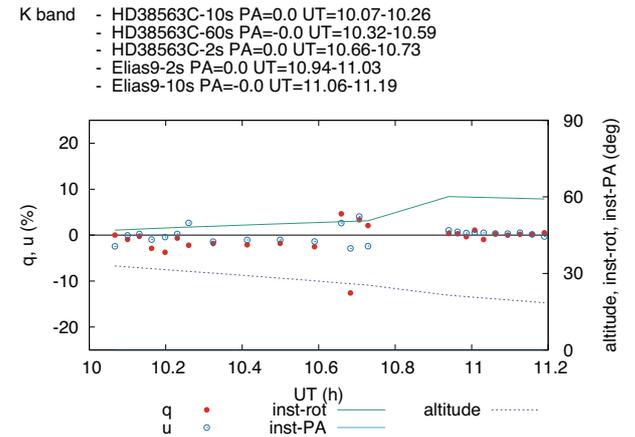
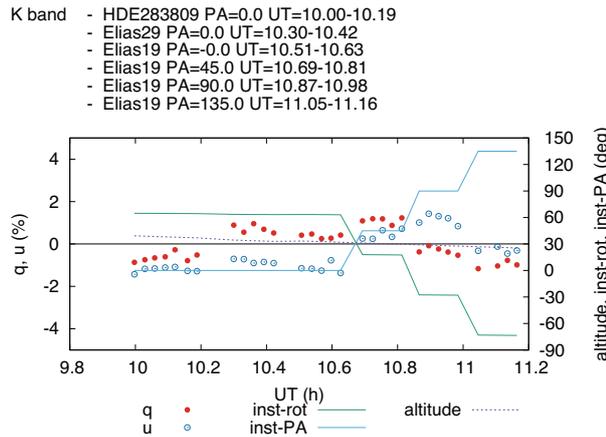
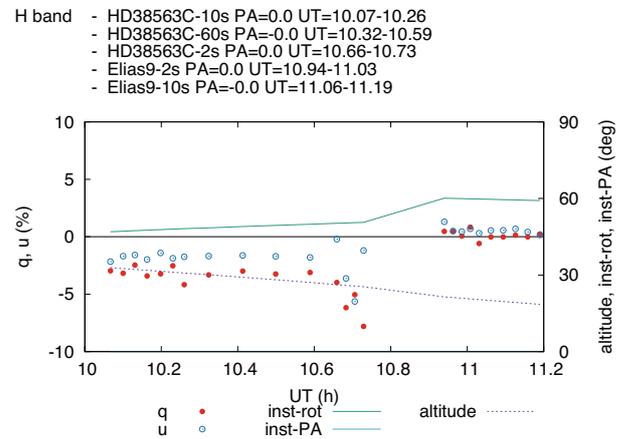
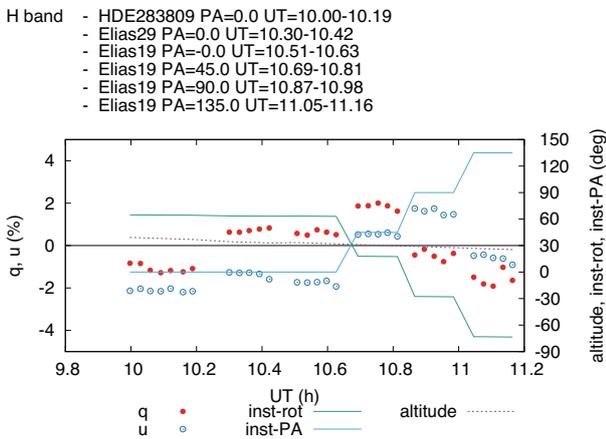
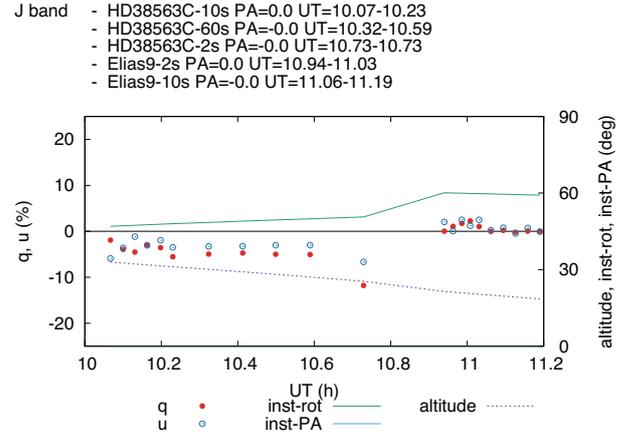
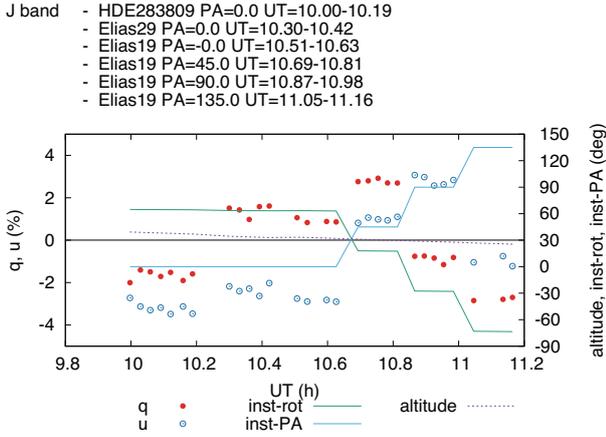
Object	$\phi$ ( $^\circ$ )	$P$ (%)	$P - P_{\text{lt}}$ (%)	$P/P_{\text{lt}}$	$\Theta$ ( $^\circ$ )	$\Theta - \Theta_{\text{lt}}$ ( $^\circ$ )
HDE 283809	0	$1.36 \pm 0.13$	0.35	0.80	$58.8 \pm 2.7$	3.8
Elias 29	0	$1.08 \pm 0.13$	0.01	1.01	$24.2 \pm 3.5$	-9.8
Elias 19	0	$1.18 \pm 0.19$	-0.18	0.87	$36.1 \pm 4.7$	-1.9
Elias 19	45	$1.19 \pm 0.14$	-0.17	0.88	$34.2 \pm 3.4$	-3.8
Elias 19	90	$1.19 \pm 0.21$	-0.17	0.88	$37.3 \pm 5.0$	-0.7
Elias 19	135	$1.03 \pm 0.14$	-0.33	0.76	$36.6 \pm 3.9$	-1.4
HD 38563C	0	$2.37 \pm 0.27$	0.16	1.07	$74.8 \pm 3.3$	-3.2
Elias 9	0	$0.24 \pm 0.23$	0.02	1.09	$157.7 \pm 28.3$	11.7
avg. $\pm$ stdv.			$-0.13 \pm 0.18$	$0.92 \pm 0.12$		$-0.7 \pm 6.3$

**Table 5.** Values of the proportionality coefficient ( $a$ ) in Equation (3).

J	H	$K_S$
$4.56 \times 10^7$	$7.43 \times 10^7$	$1.92 \times 10^7$

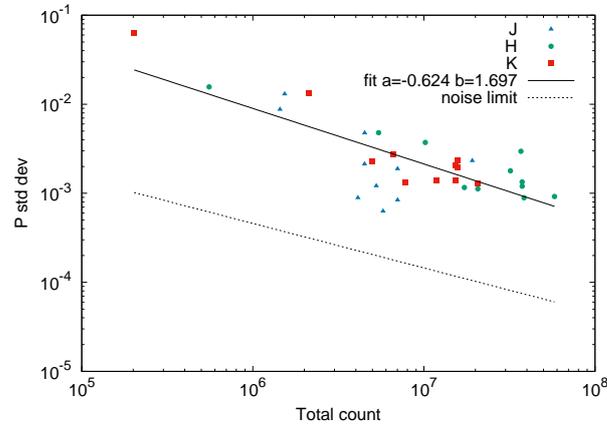
**Table 6.** Summary of the NIC polarimetry performance. Ref: †Takahashi et al. (2018), ‡this work

Property	Unit	J	H	$K_S$	Remarks, references
Field of view	arcsec <sup>2</sup>	24×69	24×69	24×69	Estimated. †
Inst. $q$	%	$-0.00 \pm 0.29$	$0.03 \pm 0.52$	$-0.02 \pm 0.30$	Incl. telescope pol. On inst. coordinate. †
Inst. $u$	%	$-0.01 \pm 0.29$	$-0.03 \pm 0.55$	$-0.07 \pm 0.31$	Incl. telescope pol. On inst. coordinate. †
Pol. efficiency	%	$98 \pm 6$	$95 \pm 7$	$92 \pm 12$	$P/P_{\text{lt}}$ ‡
Position ang. offset	deg	$0.5 \pm 1.3$	$1.3 \pm 3.1$	$-0.7 \pm 6.3$	$\Theta - \Theta_{\text{lt}}$ ‡

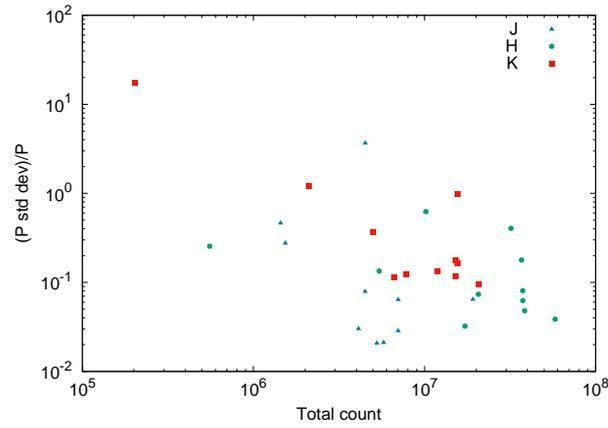


**Fig. 1.** Time-series  $q$  (red filled circles) and  $u$  (blue open circles), as derived from the observations taken on 2019-04-17. The observed strongly polarized standard stars are HDE 283809 (UT 10.00–10.19 h), Elias 29 (UT 10.30–10.42 h), and Elias 19 (UT: 10.51–11.16 h). The “inst-rot” (green solid line) and “inst-PA” (blue solid line) represent the instrumental rotator’s angles with respect to the mechanical origin and the equatorial North on the sky, respectively. The “altitude” (magenta dot line) signifies the altitudes (elevations) of the telescope pointing.

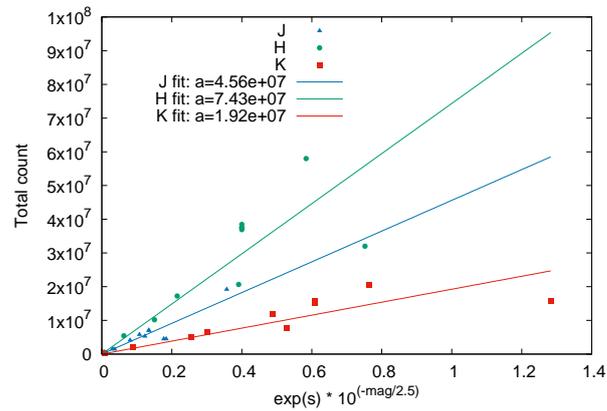
**Fig. 2.** The same figures as Fig. 1, except for 2019-04-22. The observed strongly polarized standard stars are HD 38563C (UT 10.07–10.73 h) and Elias 9 (UT 10.94–11.19 h).



**Fig. 3.**  $\sigma_P$  vs.  $C$ , where  $C$  is the total stellar counts, which are the sum of photometric counts of both ordinary and extra-ordinary images captured during  $N$  sets of observations (i.e.,  $4N$  frames).



**Fig. 4.**  $\sigma_P/P$  vs.  $C$ . The dependence of  $\sigma_P/P$  on  $C$  is much less clear than that of  $\sigma_P$  on  $C$ , shown in Fig. 3.



**Fig. 5.** The dependence of total counts on exposure time and magnitudes. Exposure time is treated as total exposure (integration) time, thus, it is equal to  $4N \times$  (single exposure time).